

# 保护性耕作条件下影响蒸发量因素的试验研究

刘立晶<sup>1</sup> 高焕文<sup>2</sup> 李洪文<sup>2</sup> 金双义<sup>3</sup>

(1. 中国农业机械化科学研究院,北京 100083; 2. 中国农业大学工学院,北京 100083;  
3. 黑龙江省庆安县农业科学研究所,黑龙江 庆安 152400)

**摘要** 为分析保护性耕作条件下影响日棵间蒸发量的因素,在一年两熟地区保护性耕作条件下对影响蒸发的各因素进行田间试验研究,对 10 种保护性耕作模式的各参数与日棵间蒸发量的拟合关系进行分析。结果表明:8 种耕作模式条件下日棵间蒸发量与叶面积指数、地表覆盖率有较好的三次函数关系,7 种耕作模式下日棵间蒸发量与地表含水率具有较好的三次函数关系,3 种耕作模式下日棵间蒸发量与地表温度具有三次函数关系。保护性耕作条件下日棵间蒸发量可近似用叶面积指数、地表覆盖率或者地表含水量计算。

**关键词** 日棵间蒸发量;地表覆盖率;保护性耕作;拟合函数

中图分类号 S 223.24

文章编号 1007-4333(2006)04-0078-05

文献标识码 A

## Experimental study on influencing factors of evaporation under conservation tillage

Liu Lijing<sup>1</sup>, Gao Huanwen<sup>2</sup>, Li Hongwen<sup>2</sup>, Jin Shuangyi<sup>3</sup>

(1. Chinese Academy of Agriculture Mechanization Sciences, Beijing 100083, China; 2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. QingAn Institute of Agricultural Sciences, Qing'an 152400, China)

**Abstract** Based on the conservation tillage systems for two crops a year region, the authors analyzed the influencing factors of evaporation under the conservation tillage. The fitting relations between evaporation and leaf index, as well as ground surface coverage, soil temperature, and surface soil moisture were investigated respectively. The results show that daily evaporation on the eight tillage systems has good cubic relations with the leaf index and ground coverage respectively; the evaporation on the seven tillage systems has good cubic relations with the soil surface water content; and the evaporation on the three tillage systems has good cubic relations with the surface soil temperature. So the evaporation quantity can be approximately estimated by the leaf index or surface coverage.

**Key words** daily evaporation; surface ground coverage; conservation tillage; fitting function

我国华北地区降雨集中在 6—8 月份,且每次降雨量较少,发生径流和渗漏的情况很少,从水量平衡角度,农田水分主要通过作物蒸腾和土壤水分蒸发而消耗<sup>[1]</sup>。

近年来,国内外对作物蒸腾、土壤蒸发的研究主要集中在农田蒸散规律、蒸腾与蒸发比例关系、抑制土壤蒸发的农艺措施等方面,提出了多种用气象数据计算腾发量的方法和模型<sup>[2-7]</sup>。但对保护性耕作条件下,影响农田日棵间蒸发量因素的研究未见报

道。笔者拟通过相关试验研究,从温度、地表含水量、地表覆盖率、作物叶面积指数等 4 个方面,分析保护性耕作条件下影响蒸发的因素及相关关系,探讨计算农田日棵间蒸发量的方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2002-06—2003-10 在河北省定兴县进行。该县位于北纬 39°21',属大陆性半干旱季风气

收稿日期:2006-02-19

基金项目:国家“十五”科技攻关计划项目(2001BA504B03)

作者简介:刘立晶,博士研究生,高级工程师,E-mail:xylilj@tom.com;高焕文,教授,博士生导师,主要从事农业装备研究与计算机测控、旱地可持续农业机械化等研究,E-mail:ghwbgs@cau.edu.cn

候,土壤为轻壤质碳酸盐褐潮土,全年无霜期约 185 d,年降雨量 500 ~ 600 mm,集中在七、八月份,种植制度为一年两熟“夏玉米-冬小麦”轮替种植。将玉米、小麦两季作物作为整体考虑,试验设计 2 个因素:因素 A 为耕作方式,4 水平;B 为覆盖量,3 水平(表 1)。

表 1 保护性耕作条件下影响蒸发因素的试验设计  
Table 1 Experimental design table of the evaporation

水平	因素	
	耕作方式(A)	覆盖量 / % (B)
1	免耕(A <sub>1</sub> )	0 (B <sub>1</sub> )
2	深松(A <sub>2</sub> )	50 (B <sub>2</sub> )
3	耙地(A <sub>3</sub> )	100 (B <sub>3</sub> )
4	翻耕(A <sub>4</sub> )	—

注: 作物收获后试验区内的秸秆量。覆盖量为 0 指所有秸秆全部移出试验地;50%为一半秸秆留在试验地;100%为秸秆全部留在试验地。

夏播时小麦秸秆覆盖地可采用免耕播种,因此不考虑耙地作业;华北地区降雨集中在夏播后,可以采用深松方式打破犁底层以利于雨水入渗<sup>[8-9]</sup>,而秋季播种采用深松会增加地表粗糙度不利于播种,但可以设计 1 种方案作为试验对照;实际生产中夏播前不进行翻耕,为使对照效果最大,可增加全程翻耕播种的方案。根据以上分析并结合生产实际的可行性,共设计 10 种耕作模式:

1) MA<sub>1</sub>B<sub>3</sub> + WA<sub>1</sub>B<sub>3</sub>; 2) MA<sub>1</sub>B<sub>3</sub> + WA<sub>3</sub>B<sub>3</sub>; 3) MA<sub>1</sub>B<sub>3</sub> + WA<sub>4</sub>B<sub>1</sub>; 4) MA<sub>1</sub>B<sub>2</sub> + WA<sub>2</sub>B<sub>3</sub>; 5) MA<sub>1</sub>B<sub>3</sub> + WA<sub>2</sub>B<sub>3</sub>; 6) MA<sub>2</sub>B<sub>3</sub> + WA<sub>1</sub>B<sub>1</sub>; 7) MA<sub>2</sub>B<sub>3</sub> + WA<sub>1</sub>B<sub>2</sub>; 8) MA<sub>2</sub>B<sub>3</sub> + WA<sub>1</sub>B<sub>3</sub>; 9) MA<sub>2</sub>B<sub>3</sub> + WA<sub>3</sub>B<sub>3</sub>; 10) MA<sub>4</sub>B<sub>1</sub> + WA<sub>4</sub>B<sub>1</sub>。其中:M 表示小麦茬上夏播玉米,W 表示玉米茬上秋播小麦。

### 1.2 试验方法及仪器

1) 蒸发器。自制小型蒸发器 (micro-lysimeters),高 130 mm,内径 85 mm,用 PVC 管制成,以防止热量交换造成蒸发误差偏大;另外,用纱网封底以保持正常的水汽交换(图 1)。

每个试验区内以等边三角形(高为 1 m)的方式摆放 3 个蒸发器。

2) 土样制备。用根钻取含有地表秸秆的原状土,推入蒸发器中,纱网封底,用精确度为 1/100 g 的电子天平称其质量,然后把蒸发器置于田间,使其

内的土表面与试验区地表面平齐;为保证蒸发器内土壤含水量与大田实际的相同,隔天换土。

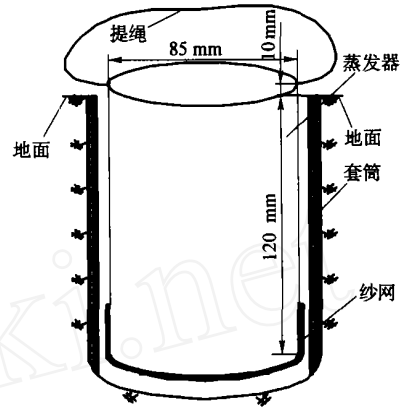


图 1 蒸发器结构及安装示意

Fig. 1 Micro-lysimeters' configuration and setting sketch map

3) 蒸发量计算。每天上午 10:00 称蒸发器的质量(包括土),与前一天蒸发器的质量相减,将其差值换算成 mm,即为日棵间蒸发量。

4) 叶面积测量。每个试验区取 3 个点,每点选 5 株玉米,用光电叶面积仪测量叶面积。

5) 地温测量。用万用表测出地温传感器的电阻 R,采用式(1)计算地温 T

$$T = (B / (\ln(R) + C))^{1/N} - 273.15 \quad (1)$$

式中,B、C 和 N 均为常数。

6) 地表秸秆覆盖率测定。在一根长绳上,每隔 20 cm 做 1 个结,共 100 个;将绳子拉直与种植方向成 45°,随机放在地面上,数出下方有秸秆的绳结数,除以总节数,即为地表秸秆覆盖率<sup>[10]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 实测日棵间蒸发量

实测的日棵间蒸发量结果见表 2。对不同耕作模式的日棵间蒸发量进行方差分析( $\alpha = 0.1$ ),结果表明各耕作模式下日棵间蒸发量差异显著。其中玉米-小麦全免耕 100% 秸秆覆盖模式(MA<sub>1</sub>B<sub>3</sub> + WA<sub>1</sub>B<sub>3</sub>)的日棵间蒸发量最小,传统耕作模式(MA<sub>4</sub>B<sub>1</sub> + WA<sub>4</sub>B<sub>1</sub>)的日棵间蒸发量最大。

### 2.2 日棵间蒸发量与叶面积指数的关系

对试验得到的叶面积指数(表 3)与相应模式下的日棵间蒸发量(表 2)进行 3 次多项式拟合,由拟合方程的相关系数(表 3)可以看出,8 个耕作模式的日棵间蒸发量与叶面积指数之间具有较好的三次函数关系,可用叶面积指数近似推算日棵间蒸发量。

表2 玉米生育期内不同耕作模式下的日棵间蒸发量

Table 2 Daily evaporation in corn growth stage under different tillage systems

mm

耕作模式	2005~07						
	02	03	04	14	15	16	17
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>3</sub>	1.22	0.96	0.78	1.06	0.84	0.70	0.42
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>3</sub> B <sub>3</sub>	1.22	1.02	0.76	1.27	0.90	0.80	0.60
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>4</sub> B <sub>1</sub>	1.70	1.36	0.87	0.99	1.03	0.85	0.70
MA <sub>1</sub> B <sub>2</sub> + WA <sub>2</sub> B <sub>3</sub>	1.69	1.34	1.15	1.25	0.96	0.87	0.52
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>2</sub> B <sub>3</sub>	1.67	1.50	1.07	1.09	0.77	0.68	0.43
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>1</sub>	1.38	1.24	0.80	0.93	0.83	0.69	0.60
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>2</sub>	1.34	1.22	0.85	1.17	0.84	0.82	0.38
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>3</sub>	1.27	1.15	1.05	1.20	0.80	0.74	0.50
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>3</sub> B <sub>3</sub>	1.67	1.40	0.94	1.24	0.71	0.66	0.42
MA <sub>4</sub> B <sub>1</sub> + WA <sub>4</sub> B <sub>1</sub>	1.72	1.62	1.25	1.41	0.99	0.82	0.60

注: M表示在小麦茬上夏播玉米, W表示玉米茬上秋播小麦; A<sub>1</sub>~A<sub>4</sub>和B<sub>1</sub>~B<sub>3</sub>表示耕作方式和覆盖量(表1)。下同。

表3 不同耕作模式的叶面积指数及其与日棵间蒸发量的相关关系

Table 3 Leaf area index and its correlation with evaporation under different tillage systems

耕作模式	2005~07							R <sup>2</sup>
	02	03	04	14	15	16	17	
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>3</sub>	0.132	0.152	0.178	1.182	1.228	1.279	1.290	0.94
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>3</sub> B <sub>3</sub>	0.123	0.150	0.175	0.832	0.917	1.197	1.367	0.54
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>4</sub> B <sub>1</sub>	0.133	0.159	0.17	0.904	1.025	1.211	1.231	0.85
MA <sub>1</sub> B <sub>2</sub> + WA <sub>2</sub> B <sub>3</sub>	0.091	0.127	0.164	0.663	0.865	1.023	1.042	0.87
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>2</sub> B <sub>3</sub>	0.120	0.140	0.197	0.747	0.944	0.956	0.999	0.99
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>1</sub>	0.079	0.107	0.158	0.872	0.909	0.921	0.931	0.98
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>2</sub>	0.102	0.106	0.148	0.689	0.869	0.97	1.055	0.85
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>3</sub>	0.088	0.120	0.140	0.787	1.090	1.197	1.241	0.94
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>3</sub> B <sub>3</sub>	0.143	0.192	0.202	0.829	0.888	1.111	1.184	0.78
MA <sub>4</sub> B <sub>1</sub> + WA <sub>4</sub> B <sub>1</sub>	0.095	0.121	0.147	0.799	0.937	1.044	1.147	0.88

### 2.3 日棵间蒸发量与地表覆盖率的关系

引入地表覆盖率的概念,考虑其对日棵间蒸发量的影响。地表覆盖率的计算公式<sup>[11]</sup>为

$$= C_r + C_c \quad (1)$$

式中:  $C_r$  为地表秸秆覆盖率(表4);  $C_c$  为作物对地表覆盖的影响参数,  $C_c = 1 - \exp(-CI)$ , 其中,  $C$  为净辐射衰减系数, 本试验中  $C = 0.843$ ,  $I$  为叶面积指数(表3)。

将式(1)计算的地表覆盖率及相应模式的日棵间蒸发量数据(表2)进行3次多项式拟合,由拟合方程的相关系数(表4)可以看出拟合效果都较好,因此可以由地表覆盖率近似推算出日棵间蒸发量。

### 2.4 日棵间蒸发量与地表温度的关系

将地表温度与日最高气温的比值(表5)与相应模式下的日棵间蒸发量(表2)进行3次多项式拟合,可以看出,10个耕作模式中只有3个耕作模式

表 4 不同耕作模式的地表秸秆覆盖率及其与日棵间蒸发量的相关关系

Table 4 Mulch coverage and its correlation with evaporation under different tillage systems

耕作模式	2005~07 <sup>-</sup>							$R^2$
	02	03	04	14	15	16	17	
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>3</sub>	0.654	0.654	0.654	0.654	0.654	0.654	0.654	0.94
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>3</sub> B <sub>3</sub>	0.654	0.654	0.654	0.654	0.654	0.654	0.654	0.72
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>4</sub> B <sub>1</sub>	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.93
MA <sub>1</sub> B <sub>2</sub> + WA <sub>2</sub> B <sub>3</sub>	0.402	0.402	0.402	0.402	0.402	0.402	0.402	0.93
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>2</sub> B <sub>3</sub>	0.654	0.654	0.654	0.654	0.654	0.654	0.654	0.97
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>1</sub>	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.94
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>2</sub>	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.97
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>3</sub>	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.83
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>3</sub> B <sub>3</sub>	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.526	0.94
MA <sub>4</sub> B <sub>1</sub> + WA <sub>4</sub> B <sub>1</sub>	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.97

的拟合情况较好,分别是玉米-小麦全免耕 100% 秸秆覆盖模式(MA<sub>1</sub>B<sub>3</sub> + WA<sub>1</sub>B<sub>3</sub>)、玉米免耕 50% 秸秆覆盖 + 小麦深松 100% 秸秆覆盖模式(MA<sub>1</sub>B<sub>2</sub> + WA<sub>2</sub>B<sub>3</sub>)及玉米深松 100% 秸秆覆盖 + 小麦免耕 100% 秸秆覆盖模式(MA<sub>2</sub>B<sub>3</sub> + WA<sub>1</sub>B<sub>3</sub>),其他模式的函数关系不可靠,由此不能明确表示温度与日棵间蒸发量的关系。

## 2.5 日棵间蒸发量与地表含水率的关系

将地表土壤体积含水率(表 6)与相应模式下的日棵间蒸发量(表 2)进行 3 次多项式拟合,可以看出:7 个耕作模式的地表土壤含水率与日棵间蒸发量拟合效果较好( $R^2 = 0.87$ ),2 个耕作模式的拟合效果一般( $R^2 = 0.81$ ),1 个耕作模式的拟合效果差( $R^2 = 0.66$ )。

表 5 不同耕作模式的地表温度与日最高气温的比值及其与日棵间蒸发量的相关关系

Table 5 Ratio of soil surface temperature and daily highest air temperature and its correlation with evaporation under different tillage systems

耕作模式	2005~07 <sup>-</sup>							$R^2$
	02	03	04	14	15	16	17	
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>3</sub>	1.01	1.19	1.18	1.06	1.13	1.06	0.80	0.93
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>3</sub> B <sub>3</sub>	1.08	1.04	1.06	0.97	1.09	0.91	0.75	0.73
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>4</sub> B <sub>1</sub>	1.06	1.18	1.23	1.13	1.19	1.19	0.83	0.77
MA <sub>1</sub> B <sub>2</sub> + WA <sub>2</sub> B <sub>3</sub>	1.23	1.32	1.27	1.14	1.36	1.21	0.81	0.86
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>2</sub> B <sub>3</sub>	0.90	1.00	1.04	0.98	1.10	0.93	0.76	0.78
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>1</sub>	0.99	1.09	1.25	1.05	1.25	1.12	0.81	0.71
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>2</sub>	1.10	1.14	1.11	1.07	1.36	1.13	0.87	0.68
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>3</sub>	0.90	1.08	1.18	1.04	1.18	1.03	0.80	0.96
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>3</sub> B <sub>3</sub>	1.01	1.26	1.21	1.07	1.15	0.98	0.82	0.73
MA <sub>4</sub> B <sub>1</sub> + WA <sub>4</sub> B <sub>1</sub>	1.06	1.15	1.21	1.08	1.40	1.09	0.86	0.78

表6 不同耕作模式0~10 cm土层土壤体积含水率及其与日棵间蒸发量的相关关系

Table 6 Soil water content in depth of 0~10 cm and its correlation with evaporation under different tillage systems

耕作模式	2005~07							$R^2$
	02	03	04	14	15	16	17	
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>3</sub>	27.54	21.16	20.83	18.00	16.57	15.90	15.36	0.93
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>3</sub> B <sub>3</sub>	18.90	18.52	16.72	16.21	16.01	14.18	13.65	0.66
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>4</sub> B <sub>1</sub>	20.95	20.39	19.09	18.60	18.18	17.47	15.06	0.95
MA <sub>1</sub> B <sub>2</sub> + WA <sub>2</sub> B <sub>3</sub>	20.02	16.86	15.83	14.46	14.23	12.31	11.02	0.95
MA <sub>1</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>2</sub> B <sub>3</sub>	18.82	18.66	17.72	15.98	14.50	14.50	13.32	0.96
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>1</sub>	20.41	17.96	17.80	16.50	15.05	14.16	13.91	0.81
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>2</sub>	23.94	20.03	17.63	18.83	18.60	17.16	16.99	0.81
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>1</sub> B <sub>3</sub>	25.63	19.72	19.07	17.50	16.90	16.00	15.39	0.89
MA <sub>2</sub> B <sub>3</sub> + WA <sub>3</sub> B <sub>3</sub>	19.33	18.89	18.34	16.99	16.33	15.95	15.20	0.87
MA <sub>4</sub> B <sub>1</sub> + WA <sub>4</sub> B <sub>1</sub>	21.79	18.57	16.59	16.41	15.43	14.28	13.80	0.97

注:土壤体积含水率数值, %。

### 3 结论与建议

1) 保护性耕作条件下, 农田日棵间蒸发量可用叶面积指数、地表覆盖率或地表含水率等参数近似计算。

2) 8种耕作模式条件下日棵间蒸发量与叶面积指数、地表覆盖率具有三次函数关系, 7种耕作模式下日棵间蒸发量与地表含水率有三次函数关系, 3种耕作模式下日棵间蒸发量与地表温度有三次函数关系。

3) 本研究仅对叶面积指数、地表覆盖率、地表含水率及地温4个参数与日棵间蒸发量的相关关系进行分析研究。进一步, 应研究蒸发量与几个参数的综合模型以分析各参数对蒸发量的影响程度。

### 参 考 文 献

- [1] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 土壤-植物-大气系统水分传输理论及其应用[M]. 北京: 水利出版社, 1994
- [2] 王菱, 倪建华. 以黄淮海为例研究农田实际蒸散量[J]. 气象学报, 2001, 59(6): 784-794
- [3] 王会肖, 刘昌明. 农田蒸散、土壤蒸发与水分有效利用

[J]. 地理学报, 1997, 52(5): 447-454

- [4] 裴冬, 张喜英, 李坤. 华北平原作物棵间蒸发占蒸散比例及减少棵间蒸发的措施[J]. 中国农业气象, 2000, 21(4): 33-37
- [5] 胡斌. 夏玉米田秸秆覆盖效果的试验研究[J]. 灌溉排水, 1998, 17(3): 46-48
- [6] 谢森传. 农田水分循环中的蒸发蒸腾计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(1): 107-110
- [7] Farahani H J, Ahuja L R. Evapotranspiration modeling of partial canopy/residue-covered fields [C]. ASAE Transaction of the ASAE St. Joseph: ASAE, 1996: 2051-2064
- [8] 牟善积, 何明华, 臧凤艳, 等. 免耕、覆盖、深松配套技术及耕作模式的研究(之三)[J]. 天津农学院学报, 1998, 5(4): 23-27
- [9] 白广明, 富刚, 周宙. 深松农作物丰产机理综述[J]. 黑龙江水利学报, 2001, 28(1): 14-15
- [10] 李洪文, 陈君达, 高焕文, 等. 旱地表土耕作效应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(2): 13-18
- [11] Ahuja L R, Rojas K W, Hanson J D, et al. The Root Zone Water Quality Model [M]. Fort Collins: Water Resources Publications LLC Highlands Ranch Co., 2000: 51-80